Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 22, No. 2, Summer 2024, p. 121-136

Determining Some Morphophysiological Traits Affecting the Root-to-Shoot Ratio in Different Cultivars of Barley (*Hordeum vulgare* L.)

R. Najib[1], M. Farsi[2*], M. Zare Mehrjardi[3], N. Moshtaghi[4]

1- Ph.D. Student of Plant Biotechnology, Department of Biotechnology and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
2, Professor, Department of Biotechnology and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
3- Assistant Professor, Department of Biotechnology, Agriculture Faculty of Shirvan, University of Bojnord, Iran
4- Associate Professor, Department of Biotechnology and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: farsi@um.ac.ir)

Received: 21 October 2023 Revised: 10 March 2024 Accepted: 13 March 2024 Available Online: 14 May 2024	**How to cite this article:** Najib, R., Farsi, M., Zare Mehrjardi, M., & Moshtaghi, N. (2024). Determining Some Morphophysiological Traits Affecting the Root-to-Shoot Ratio in Different Cultivars of Barley (*Hordeum vulgare* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research, 22*(2), 121-136. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.84953.1274

Introduction

Barley is the fourth most common cereal crop in the world after wheat, maize, and rice, which is used for animal and human feed and malt production. This plant stands out among crops due to its unexpectedly wide range of adaptation and distribution compared to other cereals, earning it recognition as a model species. Determining the variation in the morphological and physiological traits of roots and shoots in the collection of barley genotypes can provide the basis for breeding new cultivars with suitable traits for better adaptation to specific environments. So in this study, some morphophysiological characteristics of roots and shoots of commercial barley cultivars were studied to identify cultivars with a higher root-to-shoot ratio as donor parents for breeding projects.

Materials and Methods

In this study, 21 barley cultivars were grown in a randomized complete block design with six replications in greenhouse conditions. Morphological and physiological traits related to roots and shoots were measured during the tillering and heading stages. Also, some traits affecting photosynthesis and yield during reproductive growth and harvesting stages were measured. Analysis of variance, mean comparison by LSD test at 5% probability level, and multivariate statistical analyses including principal components analysis, cluster analysis by Ward method, correlation analysis, and path analysis were performed by JMP and R statistical software.

Results and Discussion

Significant genetic diversity was observed for most of the traits among cultivars ($P<0.05$). At the tillering stage, Behrokh and Mehtab cultivars and in the heading stage, Jolgeh cultivar showed the highest dry weight of root to shoot ratio. Reyhan variety showed the lowest dry weight of root-to-shoot ratio in both stages. The carbohydrate content of the root in the tillering stage and leaf proline, root volume, and the ratio of chlorophyll a to carotenoid in the heading stage had the highest significant correlation coefficients with dry weight of root to

https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.84953.1274

shoot ratio (P < 0.05). Path analysis revealed that the root carbohydrate content in the tillering stage and the ratio of chlorophyll to carotenoids and proline in the heading stage are the most effective traits of the dry weight of root-to-shoot ratio. Principal components analysis showed that the first and second principal components explain 33.63% and the first seven principal components explain 72.66% of the total changes. Also, the first principal component showed a positive and significant correlation with root to root-to-shoot ratio in the heading stage, and the second principal component showed a negative and significant correlation with this ratio (P<0.05). The studied cultivars were classified into four groups based on cluster analysis so that the fourth and second clusters in the tillering stage and the third and second clusters in the heading stage had the highest and the first cluster in both stages had the lowest dry weight of root to shoot ratio.

Conclusion

Based on the results, Jolgeh and Reyhan cultivars can be used in breeding programs to improve and produce cultivars with higher root-to-shoot ratio, optimal yield, and more adapted to specific environments. These cultivars had the highest and the lowest dry weight of root-to-shoot ratio in both stages, respectively. Also, they were placed in different dimensions of the biplot drawn based on the first two principal components. In addition, these cultivars were observed in different classes based on the cluster analysis.

Acknowledgment

This project related to the Ph.D. thesis was financially supported by the Vice President for Research of the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, and the seeds of the cultivars used in this study were provided by the Karaj Seed and Plant Improvement Institute, the authors are thankful for this cooperation.

Keywords: Cluster analysis, Correlation analysis, Genetic diversity, Path analysis, Principal components analysis

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۱۳۶-۱۲۱

تعیین برخی صفات مورفوفیزیولوژیک موثر بر نسبت ریشه به اندام هوایی در ارقام مختلف جو (*Hordeum vulgare* L.)

رسول نجیب[1]، محمد فارسی[2]*، محمد زارع مهرجردی[3]، نسرین مشتاقی[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳

چکیده

به‌منظور ارزیابی تنوع ژنتیکی برای صفات مورفوفیزیولوژیک ریشه و اندام هوایی، میزان تخصیص مواد فتوسنتزی بین این اندام‌ها و دسته‌بندی ارقام، ۲۱ رقم جو در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با شش تکرار در شرایط گلخانه کشت شدند. صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مرتبط با ریشه و اندام هوایی در مراحل پنجه‌زنی و رسیدگی و برخی از صفات موثر بر فتوسنتز و عملکرد در طی مراحل رشد زایشی و برداشت اندازه‌گیری شدند. تنوع ژنتیکی معنی‌داری برای اکثر صفات در بین ارقام مشاهده شد (***p***<۰/۰۵). در مرحله پنجه‌زنی ارقام بهرخ و مهتاب و در مرحله رسیدگی رقم جلگه بالاترین و رقم ریحان در هر دو مرحله پایین‌ترین نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی را نشان دادند. محتوای قند ریشه در مرحله پنجه‌زنی و پرولین برگ، حجم ریشه، نسبت کلروفیل a به کاروتنوئید در مرحله رسیدگی دارای بالاترین ضرایب همبستگی معنی‌دار با نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی بودند (***p***<۰/۰۵). تجزیه علیت مشخص نمود که محتوای قند ریشه در مرحله پنجه‌زنی و نسبت کلروفیل a به کاروتنوئید و پرولین برگ در مرحله رسیدگی موثرترین صفات بر این نسبت هستند. اولین مؤلفه اصلی همبستگی مثبت و معنی‌داری با نسبت ریشه به اندام هوایی در مرحله رسیدگی و دومین مؤلفه اصلی همبستگی منفی و معنی‌داری را با این نسبت نشان دادند (***p***<۰/۰۵). ارقام مورد مطالعه براساس تجزیه خوشه‌ای در چهار گروه دسته‌بندی شدند. نتایج این مطالعه می‌تواند در برنامه‌های به‌نژادی برای تولید ارقامی با نسبت ریشه به اندام هوایی بالاتر و عملکرد مطلوب مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز همبستگی، تجزیه به مولفه‌های اصلی، تجزیه خوشه‌ای، تجزیه علیت، تنوع ژنتیکی

مقدمه

جو (*Hordeum vulgare* L.) به‌عنوان چهارمین غله مهم در جهان پس از گندم، ذرت و برنج است که در تغذیه دام، انسان و تولید مالت اهمیت به‌سزایی دارد (Wang *et al*., 2021). طبق آخرین آمار ارائه‌شده فائو، در سال ۲۰۲۱ سطح زیر کشت جو در جهان ۴۸/۹ میلیون هکتار و میزان تولید کل حدود ۱۴۶ میلیون تن بوده است. ایران با دارا بودن سطح زیر کشت ۲/۱ میلیون هکتار و میزان تولید کل ۲/۸ میلیون تن به لحاظ تولید جهانی این محصول در جایگاه سیزدهم قرار دارد (FAO, 2021). جو از جمله کم‌توقع‌ترین گیاهان زراعی با دامنه سازگاری و پراکنش گسترده‌تر نسبت به سایر غلات است که به دلیل ماهیت خویش‌آمیزی و دیپلوئیدی، تعداد کم کروموزوم (x = 7)، طیف وسیع ذخایر ژنتیکی و نداشتن موانع تلاقی بین ارقام زراعی و اجداد وحشی به‌عنوان یک گونه ایده‌آل برای خانواده گرامینه در نظر گرفته می‌شود (Wang *et al*., 2021). در برنامه‌های به‌نژادی جو تولید ژنوتیپ‌های جدید با عملکرد بالا و معرفی آن‌ها به بهره‌برداران از اهداف کوتاه‌مدت و حفظ ژرم‌پلاسم جهت حفظ و توسعه تنوع ژنتیکی و استفاده در برنامه‌های به‌نژادی آینده از اهداف بلندمدت اصلاح‌گران است (Abarnak, Zarei, & Cheghamirza, 2020).

ریشه اندام رویشی مهمی است که وظیفه جذب آب، مواد معدنی، استقرار گیاه، ذخیره و تکثیر را برعهده دارد و منبعی برای هورمون‌های رشدی است. اثر رشد و معماری ریشه بر عملکرد و سایر ویژگی‌های زراعی، به‌ویژه تحت تنش‌های زیستی و غیرزیستی در محصولات عمده به‌خوبی مستند شده است (Duresso *et al*.,

۱- دانشجوی دکتری رشته بیوتکنولوژی گیاهی، گروه بیوتکنولوژی و به‌نژادی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
۲ و ۴- به‌ترتیب استاد و دانشیار گروه بیوتکنولوژی و به‌نژادی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
۳- استادیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی شیروان، دانشگاه بجنورد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: farsi@um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.84953.1274

2023; Wang *et al.*, 2021. مورفولوژی و پراکنش ریشه وابسته به ژنوتیپ، تنظیم‌کننده‌های رشدی و برهم‌کنش محرک‌های زیستی و غیرزیستی است. با توجه به تنوع ژنتیکی و انعطاف‌پذیری فنوتیپی برای پاسخ‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک ریشه و راهبردهای جستجوی آب و منابع غذایی توسط گیاه، فرصتی برای افزایش بهره‌وری محصول با انتخاب صفات ریشه‌ای وجود دارد (Wang *et al.*, 2021). متاسفانه تاکنون به دلایل مشکلات در ارزیابی خصوصیات ریشه و عدم علاقه بسیاری از محققان به صفاتی که مستقیما بازده اقتصادی تعبیر نمی‌شوند، تلاش‌ها بیشتر در جهت آزادسازی ارقام و اصلاح برای صفاتی همچون عملکرد و مقاومت در برابر بیماری‌ها و آفات بوده و تحقیقات بر روی ریشه کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Rizi & Mohammadi, 2023). از آن‌جا که گیاهان به‌منظور بهینه‌سازی کارآیی منابع مختلف را به‌طور متفاوت به اندام‌ها اختصاص می‌دهند، ریشه و اندام هوایی برای دست‌یابی به منابع با هم رقابت می‌کنند (Gargallo-Garriga *et al.*, 2014). ارتباط ریشه- اندام هوایی از طریق تعادل بین میزان جذب آب و مواد غذایی توسط ریشه و فتوسنتز اندام هوایی کنترل می‌شود. اندام هوایی تا زمانی رشد می‌کند که کاهش جذب آب و مواد غذایی توسط ریشه به‌عنوان یک عامل محدودکننده مانع رشد بیشتر گردد و برعکس ریشه تا زمانی رشد می‌کند که تقاضای آن برای مواد فتوسنتزی معادل با مقدار تامین این مواد از اندام هوایی باشد (Soltani & Faraji, 2011). آلومتری[1] رشد ریشه به قسمت هوایی معمولا به‌صورت نسبت ریشه به اندام هوایی[2] بیان می‌شود (Koocheki, & Sarmadnia, 1999). از آن‌جا که رشد مطلق ریشه به دلایل هزینه‌هایی که برای گیاه دارد ممکن است پیش‌بینی‌کننده خوبی برای عملکرد نباشد، تخصیص مواد فتوسنتزی بین ریشه و اندام هوایی ممکن است بینش منطقی‌تری را ارائه دهد (Vain, Tamm, Tamm, Annusver, & Zobel, 2023). همچنین پیش‌بینی می‌شود در آینده یکی از راهبردهای مورد توجه برای کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر و افزایش کربن خاک، اصلاح و توسعه ارقام غلاتی مانند گندم، جو، سورگوم و ذرت با نسبت ریشه به اندام هوایی بالاتر، ریشه‌های گسترده‌تر، عمیق‌تر و با نرخ تخریب کندتر باشد (Rizi & Mohammadi, 2023). مشخص شده است که نسبت ریشه به اندام هوایی تحت کنترل عوامل ژنتیکی و محیطی است (Koocheki, & Sarmadnia, 1999).

جو نسبت به سایر غلات دارای سیستم ریشه‌ای گسترده‌تر، نیرومندتر و با رشد سریع‌تر است. مشخص شده است که در جو تنظیم اسمزی با اثرات مثبت روی صفات ریشه و افزایش نرخ ریشه به اندام هوایی گیاه را قادر می‌سازد تا ضمن حفظ فشار تورژسانس بالا، نرخ فتوسنتز را بالاتر نگه دارد که موجب توسعه رشد گیاه و بهبود عملکرد می‌شود (Mokany, Raison, & Prokushkin, 2006; Afshari, Akbari, Shahbazi, & Alahdadi, 2014). همچنین مشخص شده است که تلقیح جو با قارچ *Piriformospora indica* باعث افزایش وزن تر و خشک و میزان قندهای محلول مثل گلوکز، فروکتوز و ساکارز در ریشه می‌شود و بدین ترتیب مقاومت جو در برابر خشکی بهبود می‌یابد (Ghabooli & Mondani, 2016). با توجه به اهمیت و نقش گسترش مناسب ریشه در این گیاه به‌ویژه در شرایط دیم و تاثیر آن بر جذب آب و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، سیستم ریشه‌ای به‌عنوان یکی از عوامل موثر در تولید و عملکرد جو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Elakhdar *et al.*, 2022). با این حال در مورد سیستم ریشه و نقش آن در ارتباط با جذب آب، مواد مغذی و سازگاری با محیط‌های خاص در جو دانش کمی وجود دارد (Wang *et al.*, 2021). از آن‌جا که در جو همبستگی مثبت و معنی‌داری بین رشد اندام هوایی و ریشه گزارش شده است، مشخص کردن تنوع در صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک ریشه و اندام هوایی در کلکسیون ژنوتیپ‌های جو می‌تواند زمینه را برای اصلاح ارقام جدید با صفات مناسب برای سازگاری بهتر با محیط‌های خاص فراهم کند (Elakhdar *et al.*, 2022). ارزیابی تنوع ژنتیکی در گونه‌های گیاهی با روش‌های مختلفی انجام می‌شود که کاشت و ارزیابی صفات مورفولوژیک در ژرم‌پلاسم‌ها، روش معمول برای طبقه‌بندی منابع ژنتیکی است. همچنین استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره به دلیل مد نظر قرار دادن هم‌زمان چند متغیر، در تجزیه و تحلیل تنوع ژنتیکی بر پایه داده‌های مورفولوژیک، فیزیولوژیک و مولکولی کاربرد وسیعی دارند (Rezaeinia, Bihamta, Peighambari, Abbsi, & Ataei, 2022). تجزیه خوشه‌ای یک روش مناسب برای گروه‌بندی ارقام است که به‌طور گسترده برای تجزیه الگوی تنوع ژنتیکی در گیاهان زراعی استفاده می‌شود (Moghaddam *et al.*, 2012). تجزیه به مولفه‌های اصلی نیز یکی از مهم‌ترین روش‌های آنالیز چندمتغیره به‌منظور تفسیر روابط موجود میان صفات و گروه‌بندی آن‌ها بر مبنای این روابط است (Rezaeinia *et al.*, 2022). با توجه به نقش تنوع ژنتیکی در پیشبرد اهداف به‌نژادی، بررسی ارقام جو با خصوصیات مورفوفیزیولوژیک مطلوب یکی از روش‌های دستیابی به معیارهای انتخاب در جهت بهبود عملکرد، اصلاح و معرفی ارقام تجاری در جو می‌باشد (Zali & Brati, 2020). بنابراین، هدف از مطالعه حاضر بررسی برخی از خصوصیات مورفوفیزیولوژیک ریشه و اندام هوایی در ارقام تجاری جو و شناسایی ارقام با نسبت بالاتر ریشه به اندام هوایی به‌عنوان والد اهداکننده در طرح‌های به‌نژادی برای دستیابی به ارقام جو با فنوتیپ ریشه بزرگ‌تر است.

1- Allometry
2- Root to Shoot Ratio

مواد و روش‌ها

کشت و پرورش گیاهان

این آزمایش با ۲۱ رقم جو زراعی (جدول ۱) تهیه‌شده از خزانه ژرم‌پلاسم موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با شش تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد طی سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ اجرا شد. ابتدا بذرها با استفاده از قارچ‌کش ایپرودیون-کاربندازیم[1] با غلظت دو در هزار ضدعفونی شده و سپس در سینی‌های کشت حاوی کوکوپیت کشت شدند. پس از جوانه‌زنی و استقرار، گیاهچه‌ها به گلدان‌های سطلی به قطر دهانه ۲۶ و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر منتقل شدند. به‌منظور سهولت در جداسازی و ارزیابی ریشه، آزمایش در خاکی با ترکیب ماسه رودخانه، خاک برگ و کود حیوانی با نسبت ۱:۱:۳ با بافت لومی شنی (۷۹ درصد شن، ۱۶ درصد سیلت و ۴/۸ درصد رس)، اسیدیته ۶/۵، هدایت الکتریکی ۱/۰۸ دسی‌زیمنس بر متر و ظرفیت زراعی ۱۹/۸۶ درصد اجرا شد. در هر گلدان دو بوته کشت شد. گیاهان با شرایط دمایی متوسط ۲۴/۱۶ درجه سانتی‌گراد (شب/روز) پرورش یافتند. به‌منظور بهاره‌سازی در ارقام زمستانه، گیاهچه‌های منتقل‌شده به گلدان ابتدا به مدت ۳ هفته در اتاقک رشد با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و سپس به شرایط دمایی پرورش سایر گیاهان انتقال یافتند. کلیه عملیات زراعی مورد نیاز جهت رشد و نمو مطلوب شامل آبیاری قطره‌ای و در حد ظرفیت زراعی، تغذیه با کودهای NPK و مبارزه با آفات و بیماری‌ها مطابق نیاز در طول فصل رشد صورت گرفت. ارزیابی‌ها در زمان پنجه‌زنی به‌عنوان یکی از مراحل کلیدی در ابتدای فاز رشد زایشی و مرحله رسیدگی فیزیولوژیک در انتهای فاز رشد زایشی انجام شد. صفت قطر ساقه، برخی صفات مرتبط با فتوسنتز برگ همچون خصوصیات روزنه‌ها و برگ‌ها و صفات مرتبط با عملکرد همچون تعداد پنجه و وزن هزار دانه در طول مرحله رشد زایشی و مرحله برداشت اندازه‌گیری شدند.

ارزیابی صفات مورفولوژیک

صفات طول ریشه، ارتفاع بوته، تعداد برگ، تعداد پنجه، قطر ساقه، زاویه برگ‌ها نسبت به محور اصلی و وزن هزار دانه اندازه‌گیری شدند (جدول ۲). شستشوی ریشه‌ها با کمک جریان ملایم آب انجام شد و خاک کاملاً از ریشه‌ها جدا شد. طول، عرض و سطح برگ‌ها و اندام هوایی پس از اسکن نمونه‌ها با دستگاه اسکنر، توسط نرم‌افزار JMicroVision نسخه ۱.۳.۴ ارزیابی شد. حجم اندام هوایی و ریشه با استفاده از استوانه‌های مدرج با حجم مشخصی از آب و بر مبنای تغییرات درحجم آب اندازه‌گیری شد. جهت تعیین وزن تر ریشه و اندام هوایی از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم استفاده شد. برای تعیین وزن خشک ریشه و اندام هوایی پس از برداشت، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و در نهایت توزین شدند.

اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ

به‌منظور ارزیابی مقدار نسبی آب برگ از برگ‌های جوان کاملا توسعه‌یافته استفاده شد. پس از اندازه‌گیری وزن تر[2] برگ‌ها در زمان نمونه‌گیری، وزن آماس[3] و وزن خشک[4]، محتوای نسبی آب برگ با استفاده از رابطه (۱) به‌دست آمد.

$$RWC = \left[{(F.W. - D.W.)}/{(T.W. - D.W.)}\right] \times 100 \qquad (۱)$$

ارزیابی خصوصیات روزنه‌ها

جهت ارزیابی روزنه‌ها در واحد سطح برگ، از جوان‌ترین برگ‌های کاملا توسعه‌یافته استفاده شد. عکس‌برداری با استفاده از میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ برابر و حسگر دریافت تصویر با وضوح دو مگاپیکسل انجام شد. حداقل در ۵ نمونه از موقعیت‌های تصادفی به‌دست‌آمده خصوصیات روزنه‌ای سطوح رویی و زیرین برگ با استفاده از نرم‌افزار JMicroVision نسخه ۱.۳.۴ ارزیابی شد.

اندازه‌گیری قندهای محلول و غلظت پرولین

میزان قندهای محلول به روش دابویس و همکاران (Dubois, Gilles, Hamilton, Rebers, & Smith, 1956) با استفاده از فنل سولفوریک اسید و میزان پرولین به روش باتس و همکاران (Bates, Waldren, & Teare, 1973) و با استفاده از ۱۰۰ میلی‌گرم بافت تازه ریشه و برگ استخراج شد. میزان جذب در ۴۸۰ و ۵۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV- Vis. BioTek قرائت شد. غلظت قند محلول با استفاده از منحنی استاندارد گلوکز و غلظت پرولین با استفاده از منحنی استاندارد پرولین تعیین شد.

اندازه‌گیری رنگدانه‌های فتوسنتزی

اندازه‌گیری محتوای کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها به روش لیختنتالر (Lichtenthaler, 1987) و با استفاده ۱۰۰ میلی‌گرم بافت تازه از برگ‌های جوان کاملا توسعه‌یافته و اتانول ۹۵ درصد انجام شد.

1- Iprodione- Carbendazim

2- Fresh Weight (F.W.)
3- Turgid Weight (T.W.)
4- Dry Weight (D.W.)

جدول ۱- لیست ارقام جو مورد استفاده در مطالعه

Table 1- List of barley varieties used in this study

کد Code	رقم Cultivar	عادت رشدی Growth habit	کد Code	رقم Cultivar	عادت رشدی Growth habit
1	Yousef	Spring	12	Nosrat	Facultative
2	Goharan	Spring	13	Behrokh	Spring
3	Reyhan-03	Spring	14	Reyhan	Spring
4	Kavir	Spring	15	Nowrooz	Spring
5	Nik	Spring	16	Dasht	Spring
6	Nimrooz	Spring	17	Fajre-30	Facultative
7	Zahak	Spring	18	Zarjow	Spring
8	Loot	Spring	19	Mahtab	Facultative
9	Torkman	Spring	20	Jolgeh	Winter
10	Sahra	Spring	21	Bahman	Winter
11	Oksin	Spring	-	-	-

جدول ۲- لیست صفات مورد بررسی

Table 2- The list of traits investigated

کد Code	صفت Traits	واحد Unit
A.	سطح (Area)	سانتی‌متر مربع (cm^2)
V.	حجم (Volume)	سانتی‌متر مکعب (cm^3)
H. / L. / W.	ارتفاع / طول / عرض (Height / Length / Width)	سانتی‌متر (cm)
N	تعداد (Number)	-
F. W. / D. W.	وزن تر / خشک (Fresh / Dry Weight)	گرم بر بوته ($gr. plant^{-1}$)
T. Bio	بیوماس کل (Total Biomass)	گرم (gr)
R/Sh Ratio	نسبت ریشه به اندام هوایی (Root to Shoot Ratio)	-
TKW	وزن هزار دانه (Thousand Kernels Weight)	گرم (gr)
ALA	میانگین زاویه برگ (Average Leaf Angle)	درجه (^{O}D)
SD	قطر ساقه (Stem Diameter)	میلی‌متر (mm)
RWC	محتوای نسبی آب برگ (Relative Water Content)	درصد (%)
SA	سطح روزنه (Stomata Area)	میکرومتر مربع (μm^2)
SL	طول روزنه (Stomata Length)	میکرومتر (µm)
SW	عرض روزنه (Stomata Width)	میکرومتر (µm)
SN	تعداد روزنه (Stomatal Frequency)	عدد در میلی‌متر مربع برگ (N per mm^2)
Pro.	محتوای پرولین (Proline Content)	میلی‌گرم بر گرم ماده خشک ($mg.gr^{-1}$)
Carbo.	محتوای قند (Carbohydrate Content)	میلی‌گرم بر گرم ماده خشک ($mg.gr^{-1}$)
Chl.T / Chl.a / Chl.b	غلظت کلروفیل کل، a، و b (Chlorophyll Total, a, b, Con)	میلی‌گرم بر گرم ماده خشک ($mg.gr^{-1}$)
Caro	غلظت کاروتنوئید (Carotenoid Con)	میلی‌گرم بر گرم ماده خشک ($mg.gr^{-1}$)
T	پنجه (Tiller)	–
P / L	بوته / برگ (Plant / Leaf)	–
U- / D-	روی برگ / زیر برگ (Adaxial / Abaxial Surface)	–

میزان جذب در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۹ و ۶۶۴ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. در نهایت براساس روابط (۲) تا (۵) مقادیر کلروفیل a و b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها محاسبه شد.

$$Chl.a = (13.36\times A_{664}) - (5.19\times A_{649}) \quad (۲)$$

$$Chl.b = (27.43\times A_{649}) - (8.12\times A_{664}) \quad (۳)$$

$$Chl.Total = (5.24\times A_{664}) - (22.24\times A_{649}) \quad (۴)$$

$$C(x+c) = \frac{[(1000\times A_{470}) - (2.13\times Chl.\ a) - (97.64\times Chl.\ b)]}{209} \quad (۵)$$

تجزیه و تحلیل‌های آماری

پس از انجام آزمون‌های یکنواختی واریانس‌ها و نرمال بودن توزیع‌داده‌ها، تجزیه واریانس، مقایسه میانگین به روش LSD در سطح احتمال پنج درصد و آنالیزهای آماری چندمتغیره شامل تجزیه به مولفه‌های اصلی، تجزیه خوشه‌ای به روش وارد[1] و آنالیز همبستگی توسط نرم‌افزار آماری JMP نسخه ۱۴ و رسم شکل‌ها توسط

1- Ward

نرم‌افزارهای R نسخه ۴.۳.۱ و Excel نسخه ۲۰۱۹ انجام شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس

تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در دوره زایشی و مرحله برداشت نشان داد که ارقام از نظر کلیه صفات به‌جز خصوصیات روزنه روی برگ، طول روزنه زیر برگ، میانگین زاویه برگ و تعداد برگ در مرحله پنجه‌زنی با یکدیگر تفاوت معنی‌دار داشتند (p<۰/۰۵، جدول ۳). در مرحله پنجه‌زنی به‌جز صفات سطح اندام هوایی، وزن خشک ریشه و محتوای کلروفیل کل از نظر سایر صفات بین ارقام تفاوت معنی‌دار وجود داشت (***p***<۰/۰۵، جدول ۴). تجزیه واریانس در مرحله رسیدگی نشان داد که ارقام از نظر کلیه صفات مورد بررسی به‌جز طول ریشه با یکدیگر تفاوت معنی‌دار داشتند (***p***<۰/۰۵، جدول ۵). این نتایج بیانگر تنوع بالای ارقام مورد ارزیابی است که انجام آنالیزهای بعدی را امکان‌پذیر می‌کند. در طول مرحله رشد زایشی و مرحله برداشت بیشترین درصد ضریب تغییرات به‌ترتیب در صفات سطح برگ (۲۲/۸)، تعداد پنجه (۱۸/۷) و طول برگ (۱۷/۶) و کمترین درصد ضریب تغییرات در صفات عرض روزنه زیر برگ (۶/۷) و وزن هزار دانه (۶/۸) مشاهده شد. در مرحله پنجه‌زنی بیشترین درصد ضریب تغییرات مربوط به صفات محتوای قند برگ (۴۵/۹)، حجم ریشه (۳۵/۷) و محتوای قند ریشه (۳۴/۳) و کمترین درصد ضریب تغییرات مربوط به صفت محتوای پرولین برگ (۷/۰) بود. در مرحله رسیدگی بیشترین درصد ضریب تغییرات در صفات وزن تر ریشه (۷۵/۹)، وزن خشک ریشه (۶۲/۵) و محتوای قند ریشه (۶۱/۳) و کمترین درصد ضریب تغییرات در صفات ارتفاع اندام هوایی (۱۶/۴) و نسبت کلروفیل a/b (۱۹/۵) مشاهده شد. صفت نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی بین ارقام مورد مطالعه در مرحله پنجه‌زنی و رسیدگی به‌ترتیب ضرایب تغییرات ۲۵/۱ و ۵۲/۱ درصدی را نشان دادند (داده‌ها نمایش داده نشده است).

تنوع بالای بین ارقام برای صفات، امکان انتخاب ارقام برتر جهت برنامه‌های به‌نژادی را فراهم می‌کند. صفات دارای تنوع پایین به‌جز در مواردی که این صفات عواملی مطلوب و تاثیرگذار در برنامه‌های به‌نژادی باشند، از شانس کمتری برای انتخاب در اصلاح این ارقام برخوردارند (Rezaeinia *et al*., 2022). وجود تنوع بین ژنوتیپ‌های جو از لحاظ صفات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و زراعی مشابه با صفات بررسی‌شده در این تحقیق در چندین مطالعه گزارش شده است (Hajiagha, Nouraein, & Hossienpour, 2019; Modarresi, Pourmohammad, & Sadeghzadeh, 2022). ونگ و همکاران (Wang *et al*., 2021) در ارزیابی تنوع ژنتیکی ۱۸۹ ژنوتیپ جو تنوع زیادی را در ۱۶ صفت از ۲۶ صفت اندازه‌گیری‌شده در ریشه و اندام هوایی مشاهده کردند.

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورفولوژیک در ارقام مختلف جو در دوره رشد زایشی و مرحله برداشت

Table 3- Analysis of variance for morphological traits in different cultivars of barley during reproductive growth phase and harvest phase

S.O.V	Block		Cultivar		Error		C.V.
	d.f	MS	df	MS	d.f	MS	
U-SA	5	42.99*	20	20.10ns	100	15.27	17.5
U-SL	5	0.967ns	20	0.743ns	100	0.628	10.8
U-SW	5	0.461*	20	0.252ns	100	0.151	10.3
U-SN	5	0.157ns	20	0.114ns	100	0.071	3.5
D-SA	5	0.285ns	20	0.285*	100	0.168	8.9
D-SL	5	0.903ns	20	0.695ns	100	0.631	10.3
D-SW	5	0.241ns	20	0.395**	100	0.187	11.3
D-SN	5	0.171ns	20	0.137*	100	0.078	3.8
SD	9	0.195ns	20	0.565**	180	0.126	11.3
PH	9	49.99**	20	115.8**	180	18.17	10.2
ALA	9	0.196*	20	1.300ns	180	0.092	10.3
NL	5	3.05ns	20	4.066**	100	1.490	23.1
NLT	-	-	20	0.487ns	105	0.421	19.3
RWC	2	33.60ns	20	175.1**	40	63.35	13.7
LA	2	68.50**	20	33.86**	40	10.75	21.6
LL	2	72.09ns	20	39.69**	40	13.98	18.1
LW	2	0.197ns	20	0.062**	40	0.026	15.0
TKW	2	11.51**	20	25.63**	40	1.920	2.6
NT	-	-	20	1.593**	105	0.280	19.2

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** non-significant and significant at 5% and 1% of probability levels, respectively.

جدول ٤- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در ارقام مختلف جو در مرحله پنجه‌زنی

Table 4- Analysis of variance for investigated traits in different cultivars of barley in the tillering stage

S.O.V		Block		Cultivar		Error		C.V.
		d.f	MS	df	MS	d.f	MS	
Shoot	F. W.	6	0.337*	20	0.374**	120	0.110	19.6
	D. W.	-	-	20	0.022**	126	0.007	13.3
	H.	3	117.0**	20	77.83**	60	18.06	10.8
	A.	2	0.001**	20	0.0002^{ns}	40	0.0001	10.5
	V.	-	-	20	0.220**	63	0.087	10.9
Root	F. W.	6	0.196**	20	0.036**	120	0.015	14.6
	D. W.	6	0.022**	20	0.004^{ns}	120	0.003	19.4
	H.	-	-	20	79.57**	63	19.62	18.9
	V.	3	0.640**	20	0.205*	60	0.095	18.6
T. Bio		6	0.004^{ns}	20	0.008**	120	0.003	6.6
R/Sh Ratio	F. W.	6	0.058**	20	0.022**	120	0.008	19.5
	D. W.	6	0.052**	20	0.014**	120	0.006	18.0
Pro. L.		2	0.004^{ns}	20	0.008**	40	0.003	7.4
Pro. R.		-	-	20	0.023**	42	0.002	5.3
CHO.L.		2	0.006^{ns}	20	0.127**	40	0.004	3.1
CHO.R.		-	-	20	0.063**	42	0.015	6.3
Chl. a		-	-	20	0.106*	42	0.049	18.8
Chl. b		-	-	20	0.068**	42	0.017	16.2
Caro		-	-	20	0.008**	42	0.002	16.7
Chl.T		-	-	20	0.340^{ns}	42	0.203	19.8
Chl. a/b		-	-	20	0.085**	42	0.032	12.1
a/Caro		-	-	20	0.056*	42	0.025	7.7

^{ns}، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

^{ns}, * and ** non-significant and significant at 5% and 1% of probability levels, respectively.

جدول ۵- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در ارقام مختلف جو در مرحله رسیدگی

Table 5- Analysis of variance for investigated traits in different cultivars of barley in heading stage

S.O.V		Block		Cultivar		Error		C.V.
		d.f	MS	df	MS	d.f	MS	
Shoot	F. W.	2	0.046^{ns}	20	0.568**	42	0.119	16.3
	D. W.	-	-	20	0.067*	63	0.019	14.9
	H.	-	-	20	201.3*	42	92.67	19.1
	A.	2	1.121**	20	0.442**	40	0.140	9.1
	V.	2	0.641*	20	0.335*	40	0.152	19.6
Root	F. W.	-	-	20	0.144**	42	0.019	14.8
	D. W.	3	0.082^{ns}	20	0.259**	60	0.044	19.4
	H.	-	-	20	27.03^{ns}	42	14.25	20.2
	V.	-	-	20	0.237**	42	0.047	19.6
T. Bio		6	0.004^{ns}	20	0.008**	63	0.023	15.3
R/Sh Ratio	F. W.	-	-	20	0.029**	42	0.002	10.5
	D. W.	3	0.001^{ns}	20	0.031**	60	0.001	6.0
Pro. L.		-	-	20	0.203**	42	0.003	5.9
Pro. R.		-	-	20	0.023**	42	0.002	5.3
CHO.L.		-	-	20	14912**	42	500.5	17.2
CHO.R.		2	0.190**	20	0.255**	42	0.018	8.0
Chl. a		-	-	22	0.062**	40	0.005	6.2
Chl. b		-	-	20	0.148**	42	0.013	11.4
Caro		-	-	20	0.051**	42	0.004	11.5
Chl.T		-	-	20	0.315**	42	0.028	10.6
Chl. a/b		-	-	20	0.044**	42	0.013	9.2
a/Caro		-	-	20	0.175**	42	0.053	11.0

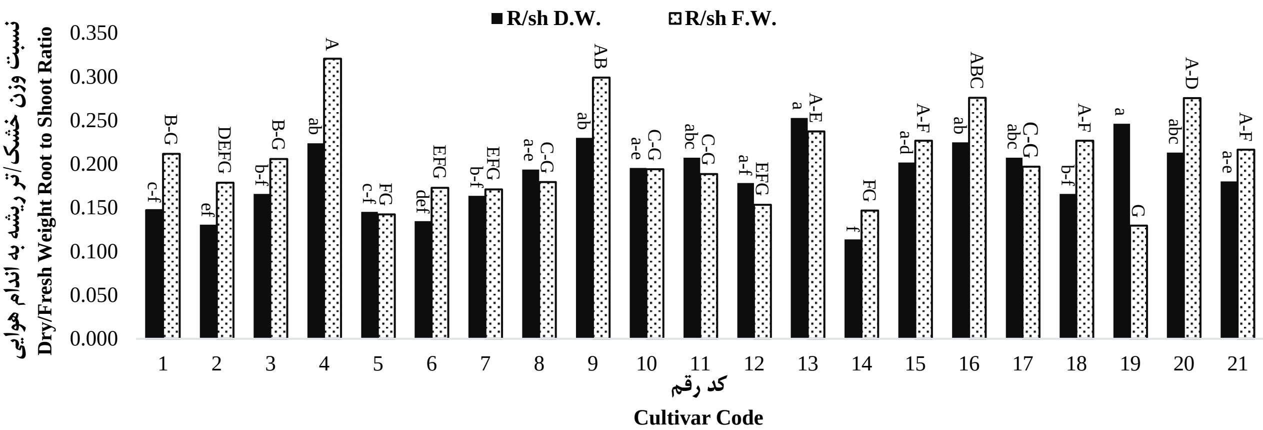
^{ns}، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

^{ns}, * and ** non-significant and significant at 5% and 1% of probability levels, respectively.

ضریب تغییرات گزارش‌شده برای صفات نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی ۱۷ درصد، طول ریشه ۲۲ درصد، وزن خشـک ریشـه، اندام هوایی و ارتفاع بوته ۲۵ درصد و تعداد پنجه ۳۴ درصد بـود. ایـن نتایج تا حدودی با ضرایب تغییرات صفات ارتفاع اندام هوایی و حجـم

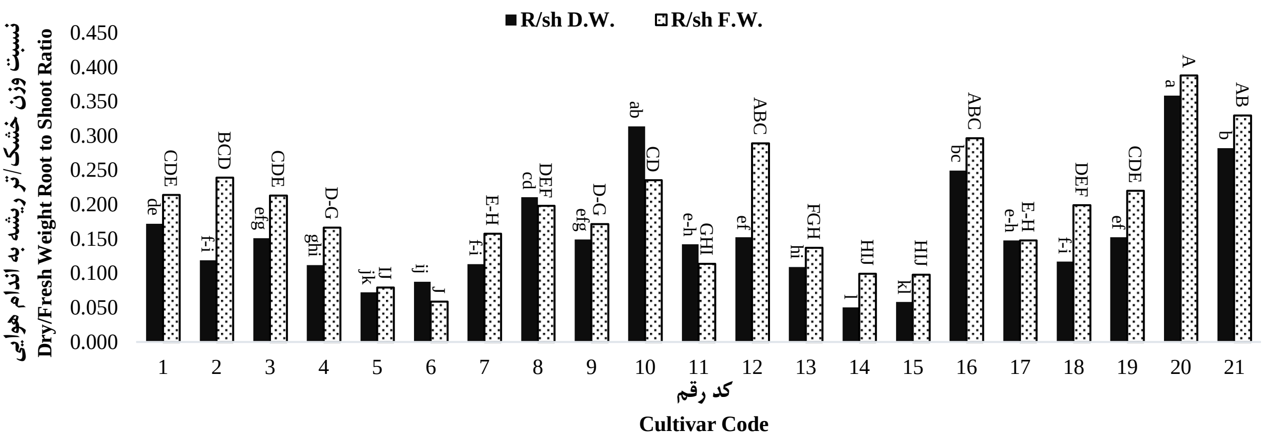
ریشه در مرحله پنجه‌زنی و وزن خشک اندام هوایی در مرحله رسیدگی مطابقت دارد. تفاوت در نوع و تعداد ارقام مورد بررسی و مراحل ارزیابی صفات را می‌توان از دلایل تفاوت ضریب تغییرات سایر صفات در نظر گرفت. زالی و براتی (Zali & Brati, 2020) ضریب تغییرات ۸/۷ درصدی را برای صفت وزن هزار دانه و ۹/۴ درصدی برای صفت ارتفاع بوته مشاهده کردند که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

مقایسه میانگین ارقام برای صفات نسبت وزن تر و خشک ریشه به اندام هوایی در مراحل پنجه‌زنی و رسیدگی به‌ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ آمده است. در مرحله پنجه‌زنی ارقام ۱۳ (۰/۲۵) و ۱۹ (۰/۲۴) دارای بالاترین و رقم ۱۴ (۰/۱۱) دارای پایین‌ترین نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی در بین ارقام مورد مطالعه بودند (شکل ۱). در مرحله رسیدگی بالاترین نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی در رقم ۲۰ (۰/۳۶) و پایین‌ترین نسبت در رقم ۱۴ (۰/۰۵) مشاهده شد (شکل ۲). در بین ارقام مذکور به‌جز رقم ۲۰، نتایج نشان داد که نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی در ارقام ۱۳، ۱۴ و ۱۹ در مرحله رسیدگی نسبت به مرحله پنجه‌زنی به‌ترتیب با ۵۶، ۵۴ و ۳۶ درصد کاهش همراه بوده است. آسچ و همکاران نیزکاهش نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی از ۰/۲ به ۰/۱–۰/۰۵ در طی فصل رشد را گزارش کردند (Asch, Dingkuhn, Sow, & Audebert, 2004). احتمالا این روند به دلیل تخصیص متفاوت مواد فتوسنتزی در مراحل رشد رویشی و ابتدای رشد زایشی نسبت به مرحله انتهایی آن است (Yu, Lo, & Ho, 2015).



شکل ۱- مقایسه میانگین صفات نسبت وزن خشک / وزن تر ریشه به اندام هوایی در ارقام مختلف جو در مرحله پنجه‌زنی (ستون‌های با حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون LSD در از نظر آماری در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند).

Figure 1- Mean comparison of dry/fresh weight root-to-shoot ratio in different cultivars of barley in the tillering stage (Columns with at least one similar letter have no significant difference at 5% probability level on the base of the LSD Test).

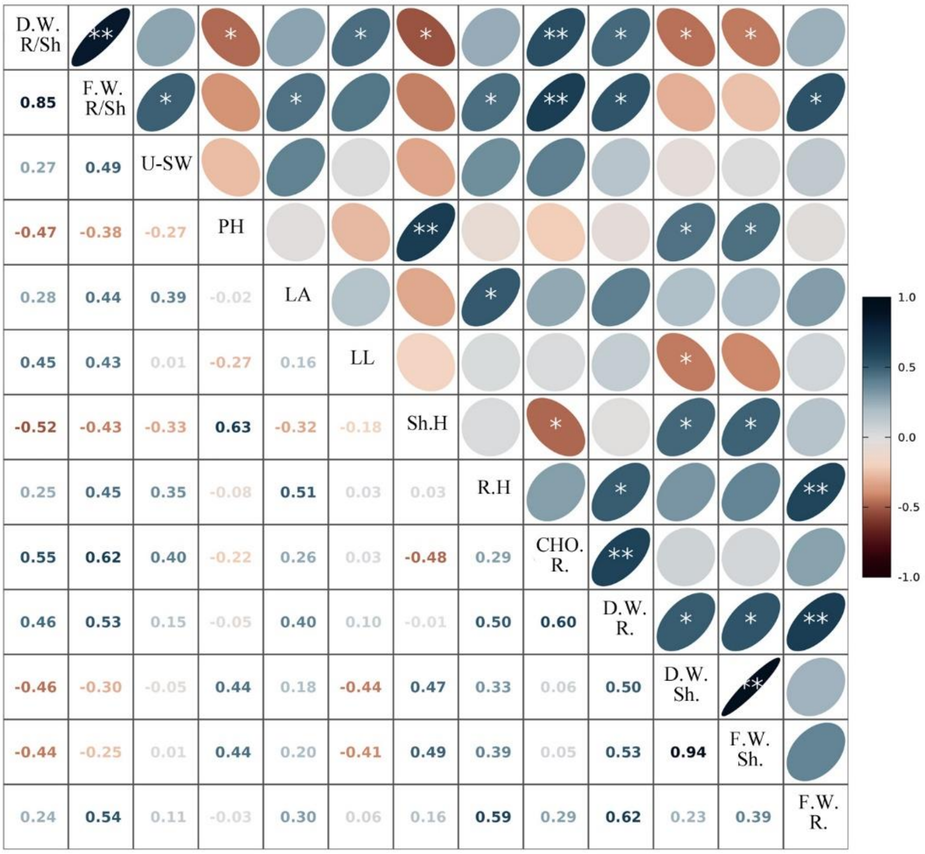


شکل ۲- مقایسه میانگین صفات نسبت وزن خشک / وزن تر ریشه به اندام هوایی در ارقام مختلف جو در مرحله رسیدگی (ستون‌های با حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون LSD در از نظر آماری در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند).

Figure 2- Mean comparison of dry/fresh weight root-to-shoot ratio in different cultivars of barley in the heading stage (Columns with at least one similar letter have no significant difference at 5% probability level on the base of the LSD Test).

آنالیز همبستگی و تجزیه علیت

همبستگی صفات در مرحله پنجه‌زنی نشان داد که محتـوای قنـد ریشه (۰/۵۵)، وزن خشک ریشه (۰/۴۶) و طول برگ (۰/۴۵) به‌ترتیب دارای بالاترین ضرایب همبسـتگی مثبـت و معنـی‌دار و ارتفـاع انـدام هوایی (۰/۵۲)، ارتفاع بوته در طول فـاز زایشـی (۰/۴۷)، وزن خشـک اندام هوایی (۰/۴۶) و وزن تـر انـدام هـوایی (۰/۴۴) بـه‌ترتیب دارای بالاترین ضرایب همبستگی منفی و معنـی‌دار بـا نسـبت وزن خشـک ریشه به اندام هوایی هستند (**p**<۰/۰۵). بین نسبت وزن خشک و تـر ریشه به اندام هوایی همبستگی مثبت و معنی‌دار (۰/۸۴) مشاهده شـد (**p**<۰/۰۵، شکل ۳).



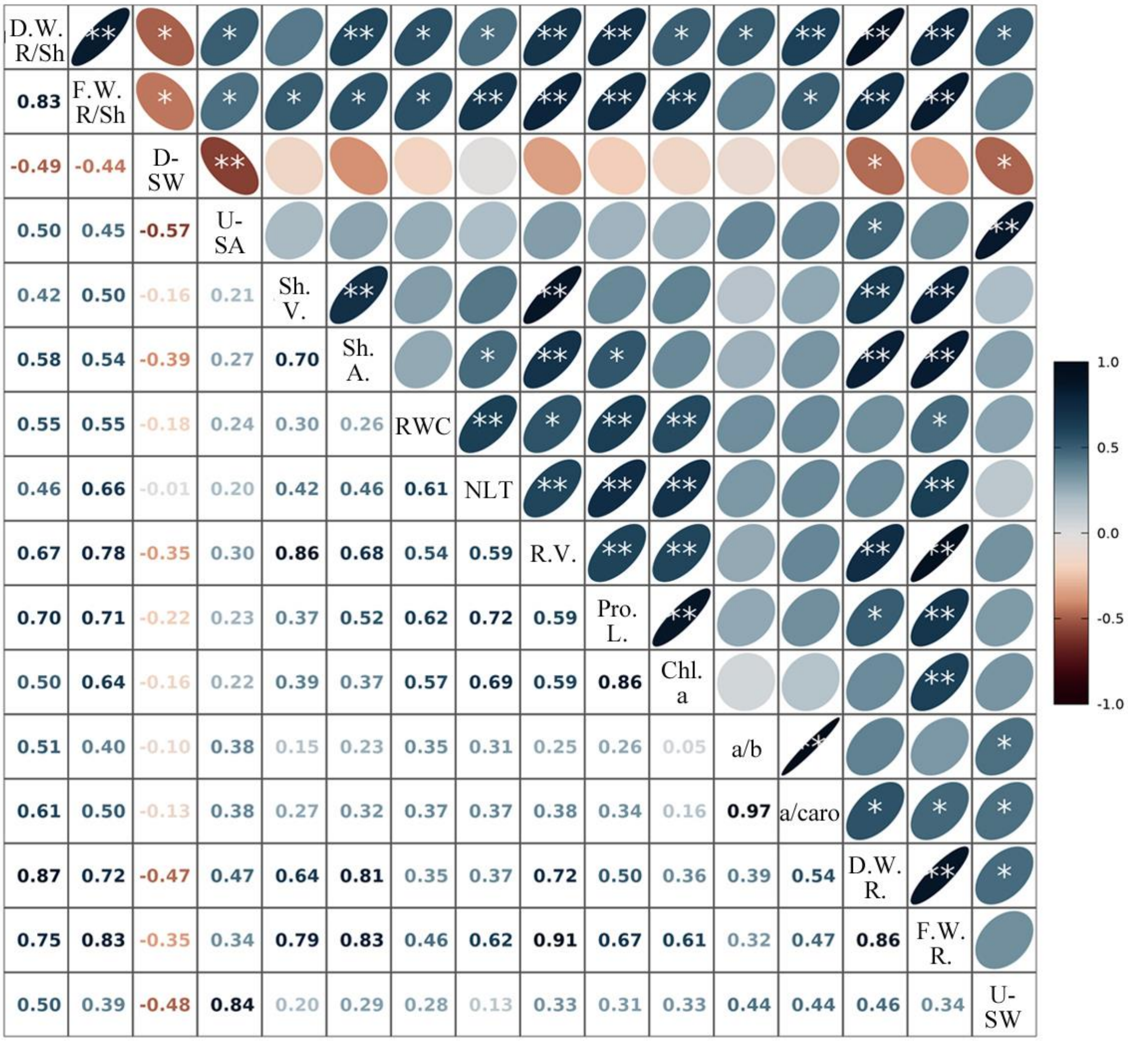
شکل ۳- همبستگی نسبت وزن تر/خشک ریشه به اندام هوایی با صفاتی که با این نسبت‌ها در مرحله پنجه‌زنی همبستگی معنی‌دار دارند.

Figure 3- Correlation between dry/ fresh weight R/Sh ratio with traits that had a significant correlation with these ratios in the tillering stage

همبستگی بـین صـفات در مرحلـه رسـیدگی نشـان داد کـه وزن خشک ریشه (۰/۸۷)، وزن تـر ریشـه (۰/۷۵)، پـرولین بـرگ (۰/۷۰)، حجم ریشه (۰/۶۷)، نسبت کلروفیل a بـه کاروتنوئیـد (۰/۶۱)، سـطح اندام هوایی (۰/۵۸)، محتوای نسبی آب برگ (۰/۵۴)، نسبت کلروفیل a به b (۰/۵۰)، عرض و سـطح روزنـه روی بـرگ (۰/۵۰)، محتـوای کلروفیل a (۰/۴۹) و تعداد برگ در مرحله پنجه‌زنـی (۰/۴۵) بـه‌ترتیب دارای بالاترین ضرایب همبستگی مثبـت و معنـی‌دار و صـفت تعـداد روزنه زیر برگ (۰/۴۹) دارای همبستگی منفـی و معنـی‌دار بـا نسـبت وزن خشک ریشه بـه انـدام هـوایی هسـتند (**p**<۰/۰۵). نسـبت وزن خشک و تر ریشه بـه انـدام هـوایی بـا یکـدیگر همبسـتگی مثبـت و معنی‌دار (۰/۸۷) را نشان دادند (**p**<۰/۰۵، شکل ۴). بین نسـبت‌هـای وزن تر و خشک ریشه به اندام هوایی در مراحل پنجه‌زنی و رسـیدگی همبستگی معنی‌داری مشاهده نشد.

براساس نتایج حاصـل از آنـالیز همبسـتگی بـا توجـه بـه این‌کـه محتوای قند ریشه و وزن خشک ریشه در مرحله پنجه‌زنـی و صـفات وزن خشک و تر ریشه، پرولین برگ و حجم ریشه در مرحله رسیدگی دارای بالاترین همبستگی معنی‌دار با نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی هستند چنین استنباط می‌شود کـه ایـن صـفات دارای اهمیـت می‌باشند. ژو و همکاران (Xu *et al*., 2015) گزارش کردند کـه بـین نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی و محتـوای قنـدهای محلـول

ریشه همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. شواهد ارزیابی‌های متابولیکی در دو گونه مدل از گیاهان سه کربنه در شرایط محیطی کنترل‌شده بیانگر غلظت بالای پرولین در اندام هوایی و غلظت بالای قندهای محلول در ریشه بود (Gargallo *et al*., 2014). در این مطالعه مشخص شد که ارقام متضاد به لحاظ صفت نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی در مرحله رسیدگی، وزن هزار دانه متفاوتی داشتند. چندین مطالعه روابط منفی بین نسبت ریشه به اندام هوایی و عملکرد دانه در غلات را نشان داده‌اند که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Vain *et al*., 2023). همان‌طور که در این تحقیق نشان داده شده است بین ارتفاع اندام هوایی و نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی رابطه منفی وجود دارد. نتایج مطالعات حاکی از وجود نواحی هم‌پوشان در QTL هایی است که بر صفات نسبت ریشه به هوایی، طول ریشه و وزن خشک ریشه تاثیر منفی و بر صفت ارتفاع اندام هوایی تاثیر مثبت می‌گذارند (Arifuzzaman *et al*., 2014). طبق نتایج، صفاتی همچون سطح اندام هوایی، تعداد برگ، محتوای نسبی آب برگ، خصوصیات مرتبط با روزنه‌ها و رنگدانه‌های فتوسنتزی به‌عنوان عواملی که همگی بر فتوسنتز تاثیرگذار هستند با نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی در مرحله رسیدگی همبستگی مثبت دارند که این موضوع می‌تواند بیانگر افزایش تولید محصولات فتوسنتزی و به دنبال آن تخصیص بیشتر مواد فتوسنتزی به ریشه باشد.



شکل ٤- همبستگی نسبت وزن تر/خشک ریشه به اندام هوایی با صفاتی که با این نسبت‌ها در مرحله رسیدگی همبستگی معنی‌دار دارند.

Figure 4- Correlation between dry/ fresh weight R/Sh ratio with traits that had a significant correlation with these ratios in the heading stage

نتایج تجزیه علیت در مرحله پنجه‌زنی نشان داد که در بین صفات، محتوای قند ریشه بالاترین اثر مستقیم (۰/۴۴) را بر نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی دارد و اثر غیرمستقیم سایر صفات بر این صفت ناچیز بود. پس از آن صفت طول برگ دارای اثر مستقیم بالایی (۰/۳۶) بود و سایر صفات بر این صفت اثر غیرمستقیم ناچیز داشتند. صفت ارتفاع اندام هوایی دارای اثر مستقیم (۰/۱۲-) بر نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی بود. بیشترین اثر غیرمستقیم برای این صفت از طریق محتوای قند ریشه (۰/۲۱-) مشاهده شد (جدول ۶).

جدول ٦- تجزیه علیت برای نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی در ارقام جو در مرحله پنجه‌زنی

Table 6- Path analysis for dry weight root-to-shoot ratio of barley cultivars in tillering stage

صفت Trait	ضریب همبستگی Correlation Coff.	اثر مستقیم Direct effect	اثر غیرمستقیم از طریق Indirect effect via			
			PH	LL	Sh.H.	CHO.R.
PH	-0.470	-0.199	-	-0.099	-0.076	-0.096
LL	0.450	0.363	0.054	-	0.022	0.011
Sh.H.	-0.522	-0.122	-0.125	-0.065	-	-0.211
CHO.R.	0.553	0.442	0.043	0.009	0.058	-

نتایج تجزیه علیت در مرحله رسیدگی نشان داد که صفت نسبت کلروفیل a به کاروتنوئید دارای بالاترین اثر مستقیم (۱/۲۸) بر نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی بود که بالاترین اثرات غیرمستقیم این صفت از طریق صفات نسبت کلروفیل a به b (۱/۰۴-) و محتوای پرولین برگ در مرحله رسیدگی (۰/۳۰) بود. سایر صفات بر این صفت تاثیر غیرمستقیم ناچیز داشتند. این صفت همچنین به طریق غیرمستقیم از طریق صفات نسبت کلروفیل a به b (۱/۲۴)، عرض روزنه (۰/۵۷) و سطح روزنه روی برگ (۰/۴۹) بر نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی تاثیرگذار است. در مرحله رسیدگی محتوای پرولین برگ به طریق مستقیم (۰/۸۸) بر نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی تاثیر داشت. این صفت همچنین به‌ترتیب دارای بالاترین تاثیر غیرمستقیم از طریق صفات محتوای کلروفیل a (۰/۷۷)، تعداد برگ در مرحله پنجه‌زنی (۰/۶۴)، محتوای نسبی آب برگ (۰/۵۵)، حجم ریشه (۰/۵۳)، سطح اندام هوایی (۰/۴۶) و تعداد روزنه زیر برگ (۰/۱۹-) بر نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی بود (جدول ۷).

جدول ۷- تجزیه علیت برای نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی در ارقام جو در مرحله رسیدگی

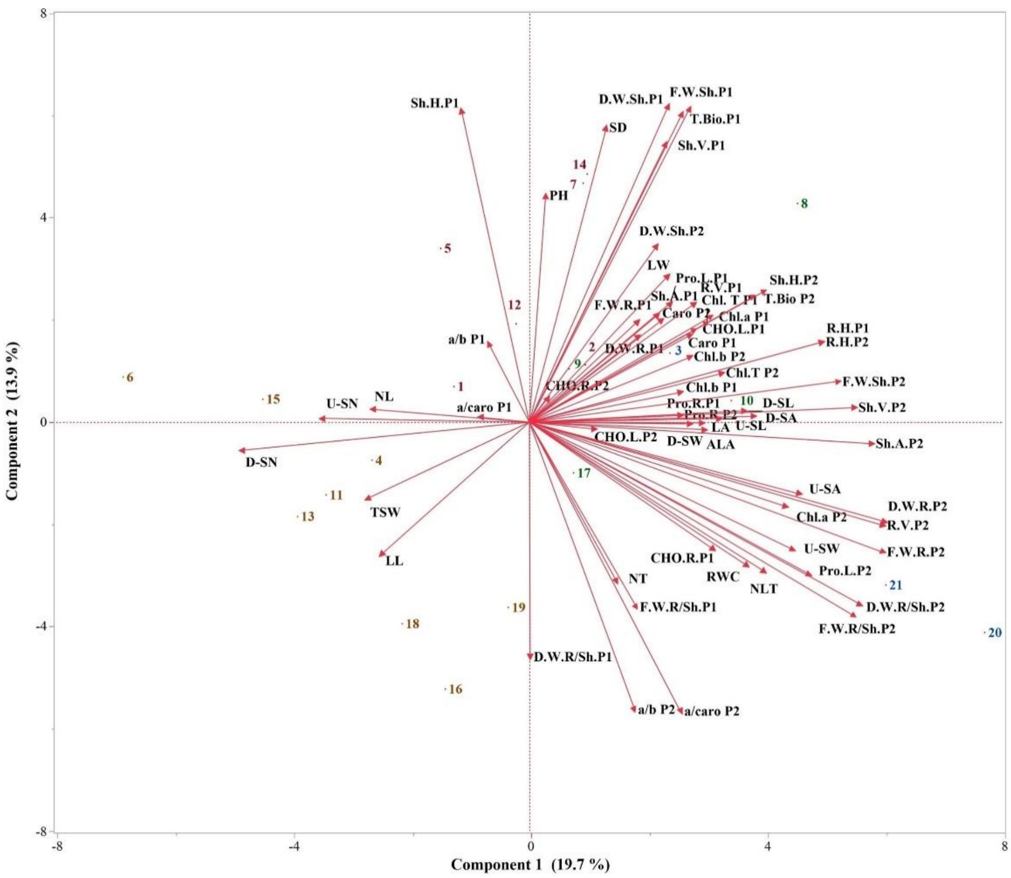
Table 7- Path analysis for dry weight root-to-shoot ratio in different cultivars of barley in heading stage

صفت Trait	ضریب همبستگی Correlation	اثر مستقیم Direct effect	اثر غیرمستقیم از طریق Indirect effect via										
			D-SN	U-SA	U-SW	NLT	RWC	Sh. A	R.V.	Pro. L.	Chl. a	a/b	a/caro
D-SN	-0.492	-0.145	-	-0.119	-0.002	0.002	-0.027	0.026	-0.074	-0.192	0.090	0.111	-0.160
U-SA	0.499	0.208	0.083	-	0.004	-0.030	0.036	-0.018	0.064	0.200	-0.128	-0.407	0.486
U-SW	0.502	0.005	0.070	0.175	-	-0.020	0.041	-0.019	0.071	0.276	-0.190	-0.478	0.570
NLT	0.458	-0.153	0.002	0.041	0.001	-	0.090	-0.030	0.127	0.641	-0.396	-0.336	0.473
RWC	0.547	0.148	0.026	0.051	0.001	-0.094	-	-0.017	0.115	0.548	-0.327	-0.377	0.472
Sh.A.	0.582	-0.066	0.057	0.057	0.001	-0.071	0.038	-	0.145	0.465	-0.212	-0.250	0.416
R.V.	0.672	0.214	0.050	0.062	0.002	-0.091	0.079	-0.045	-	0.528	-0.337	-0.274	0.483
Pro. L.	0.702	0.887	0.031	0.047	0.002	-0.111	0.091	-0.035	0.127	-	-0.496	-0.282	0.440
Chl. a	0.496	-0.574	0.023	0.046	0.002	-0.106	0.084	-0.024	0.126	0.767	-	-0.057	0.210
a/b	0.505	-1.076	0.015	0.079	0.002	-0.048	0.052	-0.015	0.054	0.233	-0.031	-	1.241
a/caro	0.607	1.282	0.018	0.079	0.002	-0.057	0.054	-0.021	0.081	0.305	-0.094	-1.041	-

نتایج حاصل از تجزیه علیت، نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز همبستگی را تایید نمود. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که محتوای قند ریشه در مرحله پنجه‌زنی و نسبت کلروفیل a به کاروتنوئید و محتوای پرولین برگ در مرحله رسیدگی به دلیل داشتن بالاترین اثر مستقیم و اثرات غیرمستقیم از طریق سایر صفات بر نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی، در انتخاب ارقام دارای نسبت بالای وزن خشک ریشه به اندام هوایی جهت برنامه‌های به‌نژادی از اهمیت بالایی برخوردارند.

تجزیه به مولفه‌های اصلی

ارتباط بین صفات مختلف با استفاده از تجزیه به مولفه‌های اصلی در نمودار بای پلات با دو مؤلفه اصلی اول در شکل ۵ آورده شده است. براساس نتایج مشخص شد که مؤلفه‌های اصلی اول و دوم در مجموع ۳۳/۶۳ درصد و هفت مولفه اصلی اول مجموعا ۷۲/۶۶ درصد از کل تغییرات را توجیه می‌کنند. اولین مولفه اصلی که ۱۹/۷۵ درصد از تغییرات کل را توجیه می‌کند شامل ارقامی است که بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار را با صفات مورفولوژیکی در مرحله رسیدگی به‌ویژه صفات مرتبط با ریشه و محتوای پرولین برگ و همبستگی منفی و معنی‌دار را با تعداد روزنه دارند (p<۰/۰۵). این ارقام دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار با نسبت‌های وزن تر و خشک ریشه به اندام هوایی در مرحله رسیدگی هستند (p<۰/۰۵). دومین مؤلفه اصلی که ۱۳/۹۰ درصد کل تغییرات را توجیه می‌کند شامل ارقامی است که با صفات مورفولوژیکی مرتبط با اندام هوایی در مرحله پنجه‌زنی بیشترین ارتباط را دارند. این ارقام دارای همبستگی منفی و معنی‌دار با نسبت ریشه به اندام هوایی در هر دو مرحله بودند (p<۰/۰۵، شکل ۵).



شکل ۵- آنالیز بای پلات تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای ارقام مختلف جو براساس صفات مورد بررسی

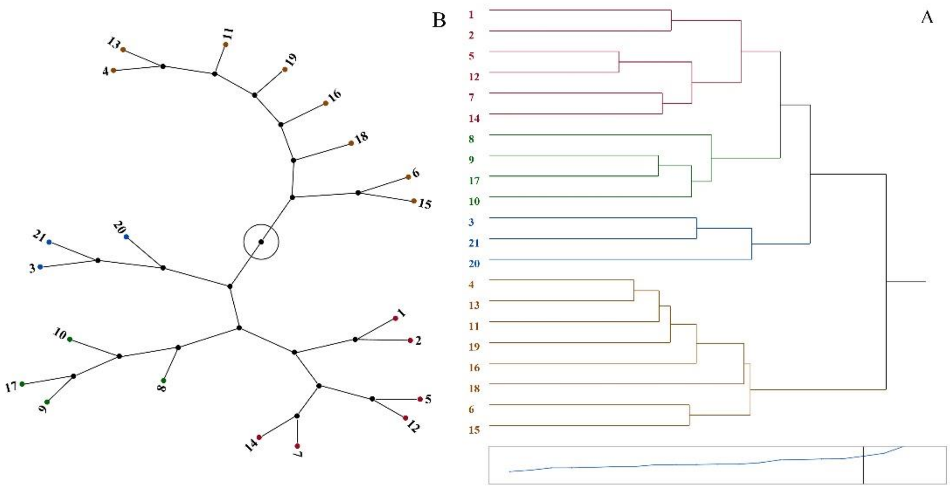
Figure 5- Biplot analysis of PCA for different cultivars of barley based on the studied traits

آنالیز همبستگی ممکن است به‌تنهایی اطلاعات کاملی در مورد روابط صفات مختلف فراهم نکند (Rezaeinia *et al.*, 2022). بنابراین به دلیل مزایای روش‌های آماری چندمتغیره و برای درک عمیق ساختار داده‌ها در مطالعه حاضر از تجزیه به مولفه‌های اصلی استفاده شد تا مهم‌ترین صفات موثر بر نسبت ریشه به اندام هوایی را شناسایی کند و گروه‌هایی از صفات که بیشترین همبستگی درون‌گروهی را دارند و با دیگر گروه‌ها کمترین همبستگی را دارند مشخص شوند. وانگ و همکاران (Wang *et al*., 2021) با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان دادند که چهار مؤلفه اصلی ۷۹/۵ درصد از تغییرات کل را توجیه می‌کند به طوری که مولفه اول مربوط به صفات مرتبط با قدرت رشد اندام هوایی و ریشه و مولفه اصلی دوم با وزن خشک ریشه مرتبط بودند که تا حدی با نتایج این مطالعه مطابقت دارد. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با استفاده از صفات ریشه و اندام هوایی در سورگوم نشان داد که سه جزء اصلی اول به‌ترتیب ۲۳/۸، ۱۵/۳ و ۱۰/۱ درصد از تغییرات کل را توجیه می‌کنند به‌طوری‌که صفات طول ریشه، وزن تر و خشک ریشه و نسبت ریشه

به اندام هوایی در یک ناحیه، خصوصیات برگ در یک ناحیه و صفات اندام هوایی در یک ناحیه قرار گرفتند که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Duresso *et al.*, 2023).

تجزیه خوشه‌ای

به‌منظور دسته‌بندی ارقام مورد مطالعه براساس صفات مورد بررسی تجزیه خوشه‌ای انجام شد. براساس نتایج حاصل از کلاستربندی، ارقام مورد مطالعه در چهار گروه قرار گرفتند. ارقام ۱، ۲، ۵، ۷، ۱۲ و ۱۴ در کلاستر اول، ارقام ۸، ۹، ۱۰ و ۱۷ در کلاستر دوم، ارقام ۳، ۲۰ و ۲۱ در کلاستر سوم و ارقام ۴، ۶، ۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۶، ۱۸ و ۱۹ در کلاستر چهارم قرار گرفتند به‌طوری‌که کلاسترهای چهارم و دوم در مرحله پنجه‌زنی و کلاسترهای سوم و دوم در مرحله رسیدگی دارای بالاترین و کلاستر اول در هردو مرحله دارای پایین‌ترین نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی بودند (شکل ۶). نتایج حاصل از تجزیه خوشه‌ای تا حد زیادی با نتایج حاصل از بای‌پلات ترسیم‌شده به‌وسیله مولفه‌های اصلی اول و دوم مطابقت داشت.



شکل ٦- دندروگرام (A) و نمودار صورت فلکی (B) حاصل از تجزیه خوشه‌ای به روش Ward در ارقام مختلف جو

Figure 6- Dendrogram (A) and constellation diagram (B) obtained from Ward's cluster analysis in different cultivars of barley

نتیجه‌گیری

این مطالعه تنوع ژنتیکی در نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی در مراحل مختلف رشد زایشی در مجموعه‌ای از ارقام جو را نشان داد. براساس آنالیز همبستگی صفات محتوای قند و وزن خشک ریشه در مرحله پنجه‌زنی و محتوای پرولین برگ، وزن خشک، وزن تر و حجم ریشه از جمله مهم‌ترین صفات موثر بر نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی بودند که این نتایج تا حدی با نتایج حاصل از تجزیه علیت تایید شد. با توجه به این‌که ارقام جلگه و ریحان به‌ترتیب دارای بالاترین و پایین‌ترین نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی در دو مرحله مورد بررسی بودند و در بای‌پلات ترسیم‌شده براساس دو مولفه اصلی اول در بعدهای مختلفی قرار گرفتند و همچنین براساس تجزیه خوشه‌ای در کلاس‌های متفاوتی مشاهده شدند می‌توانند در برنامه‌های به‌نژادی برای اصلاح و تولید ارقامی با نسبت ریشه به اندام هوایی بالاتر، عملکرد مطلوب و سازگارتر به محیط‌های خاص مورد استفاده قرار گیرند.

سپاسگزاری

از همکاری معاونت محترم پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد به جهت تامین اعتبار این پروژه مرتبط با رساله دکتری و موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج به جهت تامین بذر ارقام مورد مطالعه صمیمانه قدردانی می‌شود.

References

1. Abarnak, S., Zarei, L., & Cheghamirza, K. (2020). Comparison of Current Iranian and European Barley Cultivars for Different Agronomic and Laboratory Traits in Temperate Rainfed Conditions. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, *8*(2), 177-197. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/idaj.2019.126673.261
2. Afshari, S. B., Akbari, G. A., Shahbazi, M., & Alahdadi, I. (2014). Relations between Barley Root Traits and Osmotic Adjustment under Terminal Drought Stress. *Journal of Agricultural Science*, *6*(7), 112.

https://doi.org/10.5539/jas.v6n7p112

3. Arifuzzaman, M., Sayed, M. A., Muzammil, S., Pillen, K., Schumann, H., Naz, A. A., & Leon, J. (2014). Detection and Validation of Novel QTL for Shoot and Root Traits in Barley (*Hordeum Vulgare* L.). *Molecular Breeding*, *34*, 1373-1387. https://doi.org/10.1007/s11032-014-0122-3
4. Asch, F., Dingkuhn, M., Sow, A., & Audebert, A. (2005). Drought-Induced Changes in Rooting Patterns and Assimilate Partitioning Between Root and Shoot in Upland Rice. *Field Crops Research*, *93*(2-3), 223-236. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.10.002
5. Bates, L. S., Waldren, R. P. A., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060
6. Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. T., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, *28*(3), 350-356. https://doi.org/10.1021/ac60111a017
7. Duresso, M. E., Lule, D., Tirfessa, A., Gelmesa, D., Tesso, T., Menamo, T., & Serba, D. D. (2023). Genetic Diversity in Ethiopian Sorghum Germplasm for Root System Architecture and Trait Association. *Rhizosphere*, *27*, 100759. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100759
8. Elakhdar, A., Solanki, S., Kubo, T., Abed, A., Elakhdar, I., Khedr, R., & Qualset, C. O. (2022). Barley with Improved Drought Tolerance: Challenges and Perspectives. *Environmental and Experimental Botany*, *201*, 104965. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104965
9. FAO. (2021). FAO database collection. Available online at: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize
10. Gargallo-Garriga, A., Sardans, J., Perez-Trujillo, M., Rivas-Ubach, A., Oravec, M., Vecerova, K., & Penuelas, J. (2014). Opposite Metabolic Responses of Shoots and Roots to Drought. *Scientific Reports*, *4*(1), 6829. https://doi.org/10.1038/srep06829
11. Ghabooli, M., & Mondani, F. (2016). Effects of *P. Indica* on the Biomass, Proline, Starch and Soluble Sugars in Barley (*Hordeum Vulgare* L.) under Drought Stress. *Biological, Environmental and Agricultural Sciences*, *1*, 19-27.
12. Hajiagha, L. F., Nouraein, M., & Hossienpour, T. (2019). Investigation of Diversity and Classification of Some Barley Lines using Physiological and Morphological Characteristics. *Journal of Crop Breeding*, *11*(29), 169-180. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.29252/jcb.11.29.169
13. Koocheki, A., & Sarmadnia, G. (1999). *Physiology of Crop Plants*. Jihad-e- Daneshgahi Press, Mashhad (in Persian).
14. Lichtenthaler, H. K. (1987) Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods in Enzymology*, *148*, 350-382. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1
15. Modarresi, R., Pourmohammad, A., & Sadeghzadeh, B. (2022). Evaluation of Genetic Diversity of Spring Barley Genotypes with Respect to Some Phenological and Morphological Traits. *Crop Science Research in Arid Regions*, *4*(1), 197-212. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22034/CSRAR.2022.343913.1242
16. Moghaddam, M., Mazinani, M. A., Alavinia, S. S., Shakiba, M., Mehrabi, A., & Pouraboughaddareh, A. (2012). Study of Genetic Diversity in *T. Boeoticum* Populations under Normal and Water Deficit Stress Conditions. *Cereal Research*, *2*(1), 17-30. (in Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.22520163.1391.2.1.2.2
17. Mokany, K., Raison, R. J., & Prokushkin, A. S. (2006). Critical Analysis of Root: Shoot Ratios in Terrestrial Biomes. *Global Change Biology*, *12*(1), 84-96. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x
18. Rezaeinia, M., Bihamta, M. R., Peighambari, S. A., Abbsi, A. R., & Ataei, R. (2022). Evaluation the Diversity of Agro-Morphological Traits of Barley under Optimal and Limited Irrigation Conditions and Grouping its Foreign Germplasm Using Multivariate Statistical Methods. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *53*(3), 121-133. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/IJFCS.2021.320026.654809
19. Rizi, M. S., & Mohammadi, M. (2023). Breeding Crops for Enhanced Roots to Mitigate Against Climate Change without Compromising Yield. *Rhizosphere*, *26*, 100702. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100702
20. Soltani, A., & Faraji, A. (2011). Soil Water & Plant Relationship. Jihad-e- Daneshgahi Press, Mashhad. (in Persian).
21. Vain, S., Tamm, I., Tamm, U., Annusver, M., & Zobel, K. (2023). Negative Relationship between Topsoil Root Production and Grain Yield in Oat and Barley. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *349*, 108467. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108467
22. Wang, J., Chen, Y., Zhang, Y., Ai, Y., Feng, Y., Moody, D., Diggle, A., Damon, P., & Rengel, Z. (2021). Phenotyping and Validation of Root Morphological Traits in Barley (*Hordeum vulgare* L.). *Agronomy*, *11*(8), 1583; https://doi.org/10.3390/agronomy11081583
23. Xu, W., Cui, K., Xu, A., Nie, L., Huang, J., & Peng, S. (2015). Drought Stress Condition Increases Root to Shoot Ratio Via Alteration of Carbohydrate Partitioning and Enzymatic Activity in Rice Seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*, *37*, 1-11. https://doi.org/10.1007/s11738-014-1760-0
24. Yu, S. M., Lo, S. F., & Ho, T. H. D. (2015). Source–Sink Communication: Regulated by Hormone, Nutrient, and

Stress Cross-Signaling (a Review). *Trends in Plant Science, 20*(12), 844-857. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.10.009

25. Zali, H., & Barati, A. (2020). Evaluation of Selection Index of Ideal Genotype (SIIG) in other to Selection of Barley Promising Lines with High Yield and Desirable Agronomy Traits. *Journal of Crop Breeding*, *12*(34), 93-104. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.29252/jcb.12.34.93